

УДК 621.311.22

Баласанян Г.А., Мазуренко А.С.

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ КОГЕНЕРАЦИИ С АБСОРБИЦИОННЫМИ ТЕПЛОВЫМИ НАСОСАМИ

Широкое распространение распределенных систем энергоснабжения на базе установок когенерации обусловлено неоспоримыми экономическими преимуществами когенерационных технологий, а также возможностью создания более гибких систем, использующих разнообразные источники энергии, адаптируемых к изменениям экономических, экологических факторов, структуры энергоресурсов [1].

Когенерационные установки (КУ) малой мощности (до 1–2 МВт) на базе газопоршневых двигателей для автономного энергоснабжения потребителей не всегда позволяют полностью реализовать преимущества когенерации, поскольку имеется ряд ограничений, определяемых [2,3]:

- несоответствием графиков тепловой и электрической нагрузок потребителя соответствующим графикам КУ;
- значительной суточной и сезонной неравномерностью как электрической, так и тепловой нагрузок КУ;
- низкой эксергетической эффективностью системы в целом, вследствие наличия значительной доли низкопотенциальной энергии на выходе системы в виде тепла на отопление и ГВС;
- экологической составляющей, неотъемлемой при сжигании органических топлив в КУ.

Решить задачу повышения эффективности когенерационных установок малой мощности и конкурентоспособности систем альтернативного теплоснабжения возможно за счет внедрения интегрированных систем энергообеспечения (ИСЭ), сочетающих когенерационные установки и дополнительные (альтернативные) источники тепла, которые, благодаря своим природным особенностям, способны снять ограничения, присущие в отдельности каждой системе.

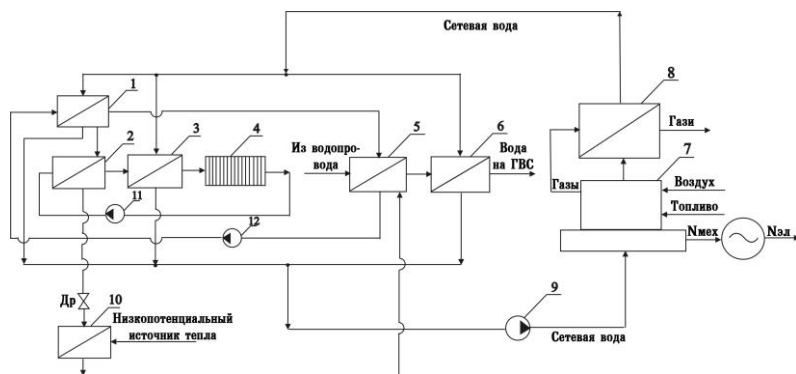
Для повышения эффективности когенерационной установки и расширения диапазона регулирования соотношения электрической и тепловой нагрузок предлагается автономная интегрированная система энергоснабжения с тепловым насосом абсорбционного типа (АТН).

Существуют различные типы абсорбционных тепловых насосов (АТН) в зависимости от их предполагаемого использования, типа среды и источника тепла для нагрева генератора, типа хладагента и др. [4]. При создании ИСЭ на базе когенерационных установок применяются бромистолитиевые АТН, холодильным агентом в которых является вода.

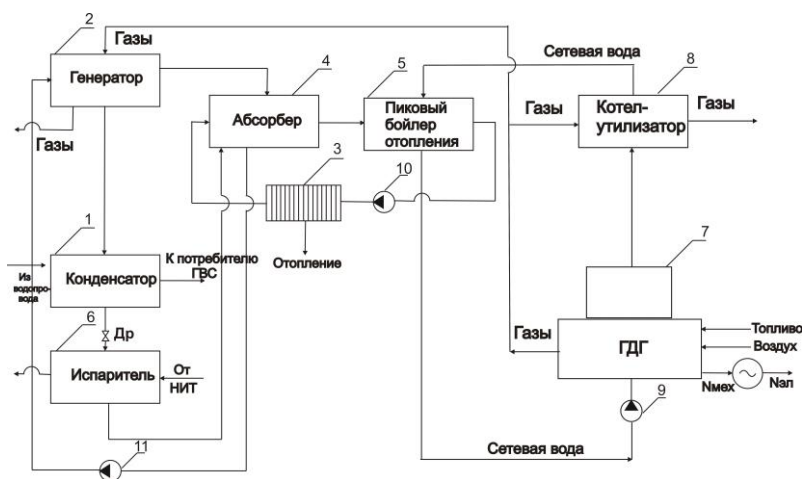
При интегрировании в систему АТН тепло к генератору теплового насоса подводится от сетевой воды КУ с температурой до 80–100 °С. Источником тепла для испарителя АТН может служить наружный воздух, грунт, речная вода, промышленные и коммунальные сточные воды и т.д., температурный уровень которых не ниже 5–10 °С. Коэффициент преобразования АТН обычно лежит в пределах 1,4–1,7, что обеспечивает расширение диапазона соотношения генерируемой электроэнергии к утилизируемому теплу когенерационной установки от 1:1,5–1:2,0 до 1:2,0–2,5, что делает систему более гибкой и создает дополнительные возможности для покрытия пиковых тепловых нагрузок коммунальных потребителей в отопительный период.

Возможно большое разнообразие вариантов интегрирования АТН в тепловую схему когенерационной установки.

Особенностью представленной схемы ИСЭ (рис. 1, а) является передача тепла от конденсатора АТН в систему отопления с последующим догревом в пиковом бойлере и от абсорбера АТН – в систему ГВС с догревом в бойлере ГВС, что соответствует температурным уровням процессов в этих аппаратах.



а)



б)

Рисунок 1 – Интегрированная система энергоснабжения

на базе газопоршневого двигателя-генератора и АТН с подогревом генератора:

а) сетевой водой КУ; б) выхлопными газами ГДГ

Обозначения для схемы а): 1 – генератор АТН; 2 – конденсатор АТН; 3 – пиковый бойлер отопления; 4 – система отопления; 5 – абсорбер АПН; 6 – пиковый бойлер ГВС; 7 – когенерационная установка; 8 – котел-утилизатор; 9 – сетевой насос; 10 – испаритель; 11 – насос системы отопления; 12 – насос абсорбера

Обозначения для схемы б): 3 – система отопления; 4 – абсорбер АТН; 5 – пиковый бойлер ГВС; 6 – испаритель; 10 – насос системы отопления; 11 – насос абсорбера

Для другого варианта ИСЭ с АТН (рис. 1, б) в качестве теплового агента для подогрева раствора в генераторе используются выхлопные газы ГДГ с температурой 400–500 °С, что позволяет поднять температуру в нем до 170–190 °С и соответственно подогрев теплоносителя в конденсаторе довести до  $t_k = 60\text{--}70$  °С, что исключает пиковый догрев воды на отопление.

Наличие в интегрированной установке двух и более видов энергетической продукции, нескольких, отличных по природе и потенциалу источников энергии, затрудняет анализ ее эффективности, требует выбора критериев оценки принимаемых схемных и технологических решений.

В настоящее время для оценки эффективности когенерационных установок малой мощности широко используются методы, основанные на энергетическом балансе, в частности, метод «равноценности теплоты и работы» [5], который характеризуется значением коэффициента использования теплоты топлива:

$$\eta_{\text{ЭЭ}} = \frac{\sum \dot{I}_i}{\sum \dot{Q}_i}, \quad (1)$$

где  $\dot{I}_i$  – мощность потока энергетической продукции определенного вида (электроэнергия, тепло и др.), кВт;  $\dot{Q}_i$  – расход «топлива» (любой энергетический поток на входе в систему – органическое топливо или другой организованный поток энергии), кВт.

Такие показатели, основанные на первом начале термодинамики, могут давать искаженное представление о степени совершенства процесса и установки в целом.

К методам, которые учитывают оба начала термодинамики, относится метод эксергетического баланса [6], характеризующий степень совершенства процесса эксергетическим КПД:

$$\eta_e = \frac{\sum E_{\text{âüö},i}}{\sum E_{\text{âüö},i}}, \quad (2)$$

где  $E_{\text{âüö},i}$  и  $E_{\text{âüö},i}$  – соответственно эксергия  $i$ -го потока рабочего тела на входе и выходе системы.

Для анализа эффективности сложных интегрированных систем предлагается также использовать значение коэффициента преобразования энергии  $\eta_{\text{ýí}}$ :

$$\eta_{\text{ýí}} = \frac{\sum E_i}{\sum Q_i}, \quad (3)$$

где  $\sum E_i$  – сумма электрической энергии и эксергий «тепловых продуктов», вырабатываемых интегрированной системой;  $\sum Q_i$  – суммарное тепло, подводимое к системе.

Коэффициент преобразования энергии  $\eta_{\text{ýí}}$  характеризует эффективность преобразования подводимой к системе тепловой энергии (энергии топлива, тепла от альтернативных источников и др.) в организованные виды энергии: электроэнергию, тепло на горячее водоснабжение (ГВС), отопление, холод и т.д.

При решении задач оптимизации параметров рабочих тел, теплоносителей, характеристик оборудования, выбора рациональной структуры интегрированных систем энергоснабжения, нашли применение термоэкономические методы, одной из разновидностей которых является эксергоэкономический метод.

Суть метода заключается в разбивке системы на отдельные энергопреобразующие компоненты, для каждого из которых можно записать уравнение баланса стоимости, которое показывает, что сумма стоимостей, связанных с процессом транспорта эк-

сергии, равна сумме стоимостей всех видов эксергии плюс соответствующая стоимость капитальных затрат и расходов на обслуживание [7]:

$$\sum_e C_{e,k} + C_{w,k} = C_{q,k} + \sum_i C_{i,k} + Z_k, \quad (4)$$

где  $C_{e,k}$ ,  $C_{i,k}$  – соответственно входная и выходная стоимости потоков эксергии в  $k$ -м компоненте;  $C_{w,k}$  – стоимость потока эксергии, связанная с затратой работы в компоненте;  $C_{q,k}$  – стоимость потока эксергии, связанная с выводом тепла из компонента;  $Z_k$  – стоимость капитальных затрат и расходов на обслуживание  $k$ -го компонента

Уравнения балансов стоимости для всех компонентов образуют систему линейных уравнений, решение которой определяет стоимость каждого материального и энергетического потока в системе.

При решении данной задачи учитываются также зависимости технологических параметров системы от капитальных затрат на устранение термодинамической неэффективности оборудования и эксплуатационные издержки. Эффективность этих затрат оценивается по эксергоэкономическому фактору:

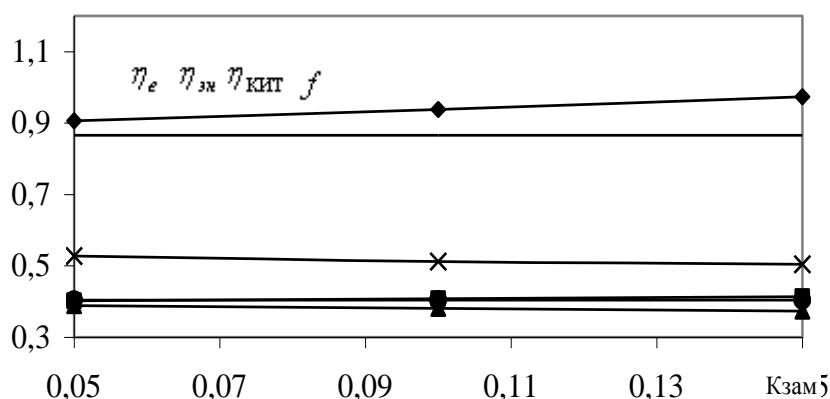
$$f = \frac{Z}{Z + c_{\text{ао}} \cdot D}, \quad (5)$$

где  $Z$  – стоимость капитальных затрат и расходов на обслуживание;  $c_{\text{ао}}$  – стоимость единицы эксергии на входе в систему.

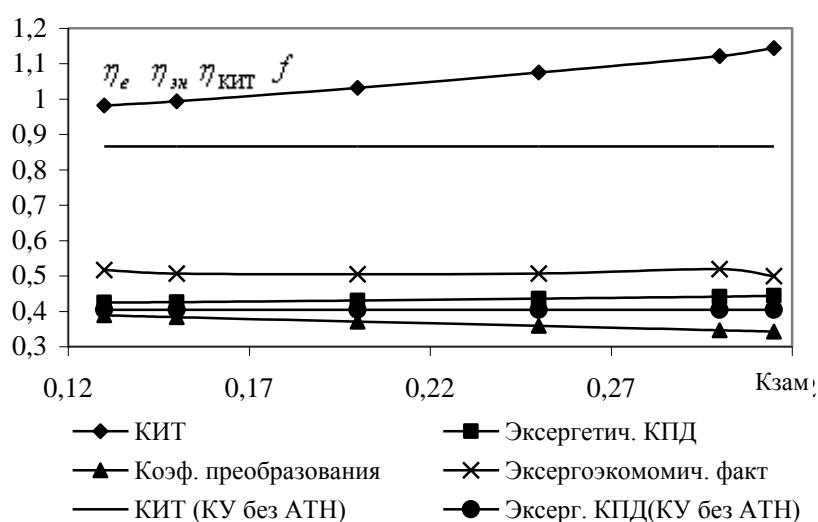
Исходные данные, используемые для численного моделирования ИСЭ с ТН абсорбционного типа:

- номинальная электрическая мощность двигатель-генератора КУ –  $N_{\text{ггг}} = 800$  кВт;
- тепловая нагрузка потребителя по ГВС –  $N_{\text{ггг}} = 600$  кВт;
- отопительная нагрузка потребителя –  $N_{\text{отт}} = 1800$  кВт;
- изменение соотношения потребляемой электрической и тепловой мощности  $N_{\text{эе}} : N_{\text{отт}} = 1:1,5-1:2,5$ ;
- изменение соотношения тепла на ГВС и отопление  $N_{\text{ггг}} : N_{\text{отт}} = 1:1-1:2$ ;
- низшая теплота сгорания газа –  $Q_{\text{д}}^{\text{г}} = 32$  МДж/м<sup>3</sup>;
- температура окружающей среды –  $t_{\text{гн}} = 15$  °С;
- коэффициент избытка воздуха на двигатель КУ –  $\alpha = 1,5$ ;
- коэффициент преобразования абсорбционного теплового насоса  $\varphi = 1,4-2,0$ .

На рис. 2, а и 2, б соответственно представлены зависимости показателей эффективности ИСЭ: эксергетического КПД  $\eta_{\text{а}}$ , коэффициента преобразования тепла в эксергию  $\eta_{\text{э}}$ , эксергоэкономического фактора  $f$ , коэффициента использования тепла топлива  $\eta_{\text{ггг}}$  для первого и второго вариантов тепловых схем от коэффициента замещения альтернативным источником тепла  $K_{\text{ггг}}$ .



а)



б)

Рисунок 2 – Зависимость показателей эффективности ИСЭ с АТН от коэффициента замещения альтернативным источником тепла при подогреве генератора:  
а) сетевой водой когенерационной установки; б) выхлопными газами КУ

Анализ представленных зависимостей показывает, что при увеличении  $K_{\text{цат}}$  термодинамическая эффективность ИСЭ возрастает (возрастают соответственно  $\eta_a$  и  $\eta_{\text{ЕЭД}}$ ), что связано с замещением части энергии органического топлива низкопотенциальным теплом из окружающей среды. Второй вариант тепловой схемы обеспечивает более высокий уровень значений  $\hat{E}_{\text{цат}}$  (соответственно в диапазоне от 0,13 до 0,32) по сравнению с первым вариантом ( $\hat{E}_{\text{цат}}$  для первого варианта соответственно меняется в диапазоне от 0,05 до 0,16), что обусловлено более высоким температурным уровнем в генераторе АТН, создаваемым выхлопными газами КУ, в отличие от сетевой воды когенерационной установки для первого варианта. Соответственно термодинамическая эффективность тепловой схемы с подогревом генератора АТН выхлопными газами КУ выше (для второго варианта значение  $\eta_a$  достигает 0,444 и соответственно для первого варианта – 0,414;  $\eta_{\text{ЕЭД}}$  для второго варианта достигает значения 1,114 и для первого варианта – 0,974).

**Выводы**

1. Для интегрированных систем когенерации с АТН, характеризующихся наличием нескольких видов энергетической продукции и нескольких, отличных по природе и потенциалу источников энергии, предложены критерии оценки эффективности, используемые для анализа принимаемых схемных и технологических решений.

2. Исследования термодинамической эффективности совместного использования когенерационной установки и АТН подтвердили возможность создания более гибких и эффективных систем, использующих низкопотенциальные источники тепла для снижения потерь, неизбежных при преобразовании эксергии топлива в энергетически «малоценные» продукты для коммунальных потребителей.

3. Установлено, что оптимальное значение доли утилизированного тепла когенерационной установки с АТН  $d_{\text{AOT}}$ , отводимого к генератору АТН, для тепловой схемы рассматриваемой конфигурации, при использовании в качестве теплоносителя сетевой воды составляет 0,15, а при использовании уходящих газов – 0,3.

**Литература**

1. Мхитарян Н.М. Энергосберегающие технологии в жилищном и гражданском строительстве. – Киев: Наукова думка, 2000. – 220 с.

2. Баласанян Г.А., Мазуренко А.С. Согласование графиков тепловой и электрической нагрузок для систем когенерации малой мощности // Пром. Теплотехника. – 2005. – № 3. – С. 32–39.

3. Баласанян Г.А., Мазуренко А.С. Оптимизация параметров тепловой схемы интегрированной системы энергоснабжения// Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2006. – Вып. 1(23). – С. 43–48.

4. Бадылькис И.С., Данилов Р.Д. Абсорбционные холодильные машины. М.: Пищевая промышленность, 1966. – 335 с.

5. Басок Б.И., Базеев Е.Т., Диденко В.М., Коломейко Д.А. Анализ когенерационных установок. 1. Классификация и основные показатели. // Пром. теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 3–4. – С. 83–89.

6. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа.— М.: Энергия, 1973.— 226 с.

7. Джордж Тсатсаронис. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы. — Одесса: ООО «Студия «Негоциант», 2002. – 152 с.

УДК 621.311.22

Баласанян Г.А., Мазуренко А.С.

**ЕФЕКТИВНІСТЬ ІНТЕГРОВАНІХ СИСТЕМ КОГЕНЕРАЦІЇ  
З АБСОРБЦІЙНИМИ ТЕПЛОВИМИ ПОМПАМИ**

Запропоновано критерії оцінювання ефективності інтегрованих систем когенерації з тепловими помпами абсорбційного типу. Досліджена термодинамічна ефективність двох варіантів теплових схем інтегрованих систем з тепловими помпами. Підтверджено ефективність використання низькопотенційних джерел тепла для зниження втрат палива при енергозабезпеченні комунальних споживачів.